

基于极化有源定标器的 高分三号 SAR 在轨测试分析

李 亮^{1,2}, 洪 峻^{1,2}, 陈 琦³, 王爱春³, 王 宇¹, 明 峰¹, 朱勇涛¹

(1. 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国资源卫星应用中心, 北京 100000)

摘 要: 高分三号(GF-3)是我国第一部全极化星载合成孔径雷达,也是世界上最为先进的全极化星载合成孔径雷达之一,在轨测试和定标是其定量化和全极化应用的前提,卫星发射后,开展了为期三个月的在轨测试和定标. 本文提出了一种新型全极化有源定标器设计方案,利用研制的新型全极化有源定标器获取的在轨测试数据,分析了 SAR (Synthetic Aperture Radar) 天线方向图、SAR 发射脉冲特性以及 SAR 发射天线极化隔离度等指标,分析结果表明,高分三号 SAR 具有良好的性能指标. 根据全极化成像结果对极化有源定标器指标进行了验证,验证结果表明,有源定标器可以提供不同的散射矩阵且具有良好的点目标特性和极化隔离度指标.

关键词: 高分三号; 合成孔径雷达; 有源定标器; 极化定标

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)09-2157-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.016

In-orbit Calibration of GF-3 SAR Using Quad-polarized Transponder

LI Liang^{1,2}, HONG Jun^{1,2}, CHEN Qi³, WANG Ai-chun³, WANG Yu¹, MING Feng¹, ZHU Yong-tao¹

(1. National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. China Centre For Resource Satellite Data and Application, Beijing 100000, China)

Abstract: GF-3 is the first quad-polarized spaceborne SAR (Synthetic Aperture Radar) of China and it is one of the most advanced quad-polarized spaceborne SARs. In-orbit calibration is very essential for reliably and quantitatively measuring, and system calibration has been performed during the first three months since launch. A design concept of quad-polarized transponder is proposed. Based on the data obtained using the novel quad-polarized transponders developed for GF-3 during the calibration campaign, this paper analyzes some performances of GF-3 SAR such as the azimuth antenna pattern, the characteristic of SAR pulse and the polarization isolation in azimuth. The analysis result shows that the performances of GF-3 are quite well. Furthermore, the performances of the transponders are validated using the quad-polarized image result. It is proved that the transponders not only can provide various types of scattering matrix but also have a perfect performance of reference point target and the polarization isolation.

Key words: GF-3; SAR; transponder; polarimetric calibration

1 引言

高分三号是我国第一颗全极化星载合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR), 具有聚束、扫描、条带、全球观测以及波模式等十多种工作模式^[1], 具有全极化成像能力且具有很高的成像分辨率, 是目前国际上较为先进的星载合成孔径雷达之一.

相比普通合成孔径雷达, 极化 SAR 能够几乎同时获取地物目标的四种不同极化组合状态的信息, 是目前能够获取目标区域雷达散射特性最为丰富的传感器, 极化 SAR 测量的极化散射矩阵全面地描述了地物目标的散射特性^[2]. 但是, 极化 SAR 系统接收机和发射机存在不同极化通道之间耦合和通道不平衡, 这使得极化 SAR 的测量矩阵一般不等于目标的散射矩阵, 即存在极化矩阵的

失真,因此在极化 SAR 数据应用中,为了准确的应用包含在雷达数据中的信息和完成极化合成处理,必须对极化失真进行校正,否则不具备极化测量的功能,对极化失真矩阵校正的过程即为极化定标^[3].

高分三号自 2016 年 8 月发射后,经过一个月的试运行,于 2016 年 9 月至 11 月开展了为期两个多月的在轨测试,专门为高分三号研制的 5 台新型全极化有源定标器全程参与了在轨测试任务,获得了 200 多台次的定标数据,完成了高分三号的辐射定标、极化定标、几何定标、SAR 天线方向图测量以及 SAR 发射脉冲特性监测等任务.

本文利用有源定标器获取的定标数据,对 SAR 天线方向图、极化隔离度、SAR 信号脉冲特性等指标进行了分析,分析结果表明,高分三号 SAR 具有良好的性能指标.根据全极化成像结果对有源定标器指标进行了验证,验证结果表明,有源定标器可以提供不同的散射矩阵且具有良好的点目标特性和极化隔离度指标.

2 极化有源定标器设计与实现

极化有源定标器可以提供较高的极化隔离度,实现不同的极化矩阵,是极化 SAR 在轨测试的关键设备.目前,主要有以下两种形式实现全极化有源定标器:(1)通过有源定标器天线旋转实现不同的散射矩阵,Radarsat-2 和 Sentinel-1 均采用这种方式^[4-6],但是由于天线极化状态对旋转角比较敏感,对旋转角精度的要求很高,容易产生极化误差,且旋转后天线增益降低 3dB,需要增加通道增益为代价进行补偿;(2)采用四天线形式,即 H 极化接收天线、V 极化接收天线和 H 极化发射天线、V 极化发射天线,韩国 KOMPSAT-5 有源定标器采用该形式^[7],该设计在一定程度上简化了设计思想,比较直观地提供了极化散射矩阵,但是,四天线形式导致系统比较笨重,降低了使用方便性.本文在考虑上述两种极化有源定标器优缺点的基础上,采用高隔离度双极化天线实现了极化定标所需要的不同散射矩阵,该方案采用一收一发双天线形式,收发天线均为高隔离度双极化天线,可以实现 H/V 极化信号的接收和转发,提供不同的极化散射矩阵,原理框图如图 1 所示.该设计既避免了天线旋转带来的极化误差和增益下降问题,又克服了四天线形式导致的系统使用不方便问题,通过开关控制可以实现 $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 等四种散射矩阵的定标参考目标,用于高分三号的极化定标和检验,其性能指标和使用方便性在高分三号在轨测试中得到了检验.

该极化有源定标器通过开关控制可以提供不同散射矩阵的定标参考目标,实现极化 SAR 定标所需要的三种

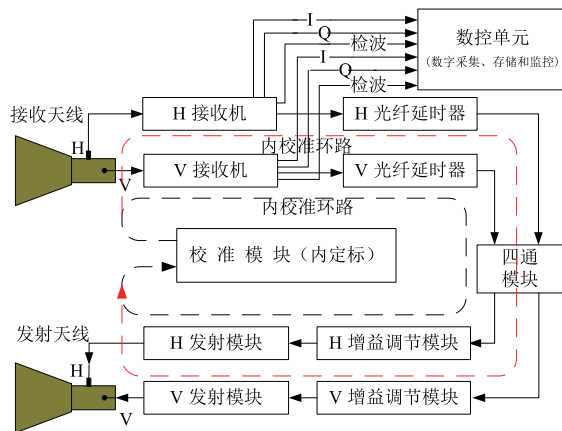


图1 极化有源定标器原理示意图

不同类型的定标参考目标,利用文献[3,8]介绍的极化定标方法可以实现对极化 SAR 失真测量矩阵的测量和标定.另外,有源定标器具有接收功能,一方面可以通过检波获取 SAR 发射脉冲的包络信号,实现方位向发射方向图测量;另一方面,通过高速数字采集可以获得 SAR 发射脉冲信号,实现对 SAR 发射脉冲特性的分析^[9].

根据上述方案,针对高分三号研制了 5 台新型全极化有源定标器,并参加了为期两个月的在轨测试,如图 2 所示,保障了在轨测试期间的稳定可靠工作.



图2 全极化有源定标器

2.1 高隔离度双极化天线

天线是有源定标器的关键部件,特别是对于极化有源定标器,天线的形式和性能指标在一定程度上决定了有源定标器整体结构和性能指标.高隔离度双极化天线即要保证具有较高的极化隔离度,又要求天线可以同时收发 H 和 V 极化信号,其极化隔离度与信号带宽、天线增益以及馈电结构有关^[10].本文针对极化有源定标器的技术指标,采用如下关键技术设计:(1)采用混合模激励,单纯的 TE 模或 TM 模不可能获得低正交极化性能,如果将 TE₁₁ 模和 TM₁₁ 模按照特定的传输比和相位关系混合,就可获得优良的低交叉极化性能;(2)在光壁圆锥喇叭中嵌入波纹槽,形成波纹圆锥喇叭,如图 3 所示,通过波纹波导可以在很宽的频带内获

得满意的混合效果,即可以实现宽带范围较好的极化隔离度;(3)正交模耦合器采用方形波导,相对于圆形波导,方形波导虽然加工难度增大,但较易获得高隔离度,两种形式的主模场结构如图 4 所示,从图 4 可以看出方形波导不易产生交叉分量,容易获得较高的隔离度;(4)正交模耦合器采用多级阶梯实现方形波导向矩形波导转换,有效改善端口的电压驻波比和端口隔离度,如图 5 所示。

基于上述关键技术,研制了一款高隔离度双极化天线,该天线作为接收天线时即可以接收 H 极化信号也可以接收 V 极化信号,该天线作为发射天线时,可以同时发射 H 和 V 极化信号,且具有较高的隔离度.并在微波暗室对研制的天线进行了测试,主要针对极化隔离度和天线方向图进行了测试,测试结果见图 6。

天线极化隔离度一般在轴向上最大,偏离轴向越大,极化隔离度越低.有源定标器实际工作期间,由于卫星处于运动状态,收发天线轴向不可能始终与 SAR 天线轴向严格对准,因此,要求天线极化隔离度在偏离轴向一定范围内均满足指标要求.图 6 给出了天线方向图测试结果,其中图 6(a)、(c)、(e)分别为 5280MHz、5400MHz、5520MHz H 极化为同极化,V 极化为交叉极化时的天线方向图.图 6(b)、(d)、(f)分别为 5280MHz、5400MHz、5520MHz V 极化为同极化,H 极化为交叉极化时的天线方向图.从图中可以看出,交叉极化隔离度在 $\pm 5^\circ$ 范围内都优于 45dB,满足极化定标需求。

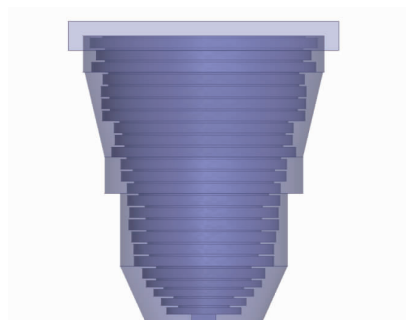
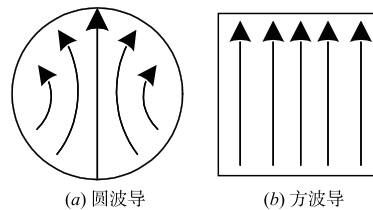


图3 波纹喇叭结构示意图



(a) 圆波导 (b) 方波导
图4 圆波导和方波导截面电场图比较

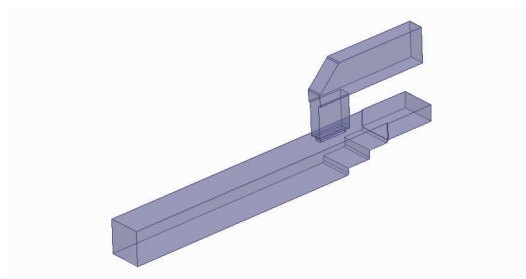


图5 正交模耦合器内腔结构示意图

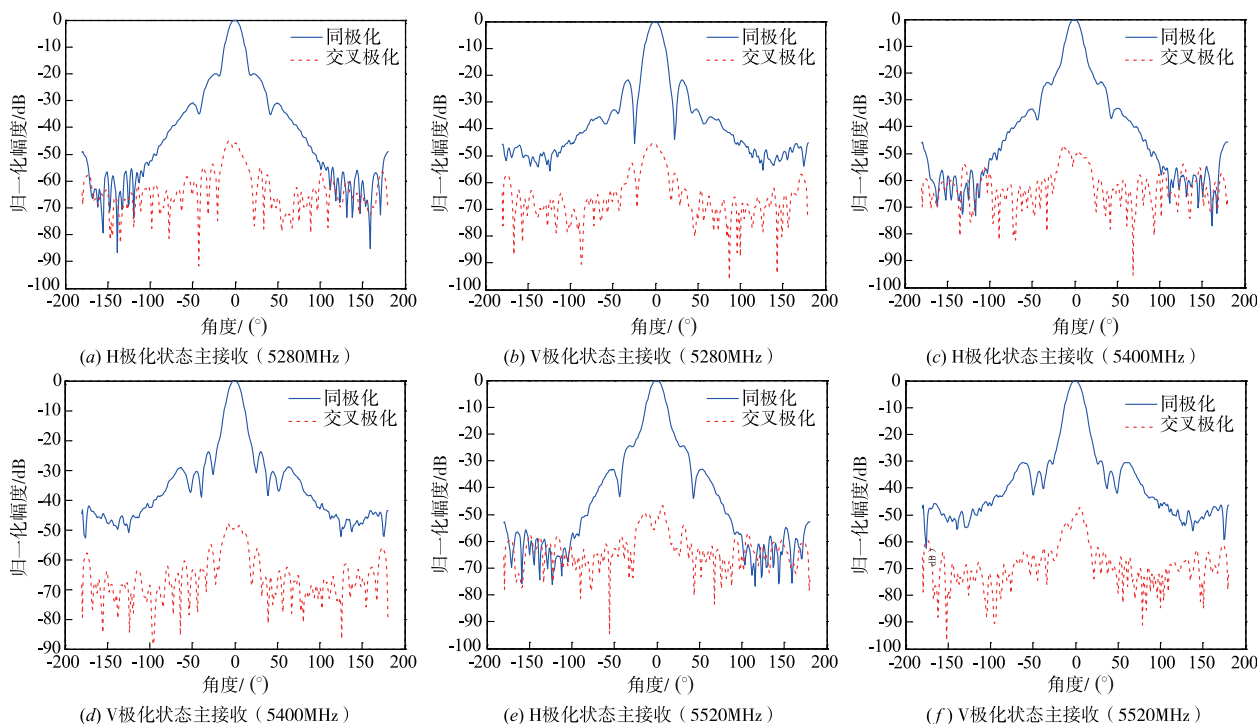


图6 实测的天线方向图 (包含了极化隔离度指标)

2.2 高性能射频电路

天线完成不同极化信号的接收与发射,射频电路则实现信号的放大以及不同极化通道间的幅度一致性和相位一致性调节.由极化定标需要的散射矩阵可知,不仅要求有源定标器具有较高的通道增益稳定性,还要求极化通道的幅度和相位具有很高的一致性,从极化定标算法可知,若有源定标器的极化通道幅度和相位一致性指标较差,将影响 SAR 系统幅相一致性以及极化隔离度定标结果.为了保证通道幅度和相位稳定性及一致性,射频电路设计过程中我们专门针对使用需求设计了内部增益校准电路和相位校准电路^[11],如图 7 所示.校准电路采用如下关键技术,以保证校准精度:

(1) 校准模块采用恒温设计,恒温精度优于 5°C ,保证了不同温度下校准模块的稳定性;

(2) 采用 16 位采集卡对校准信号进行采集,保证了较高的分辨率,提高了校准灵敏度,进而提高校准精度;

(3) 采用脉冲差值校准,消除了校准源不稳定引起的误差,减少了误差因素,提高了校准精度.

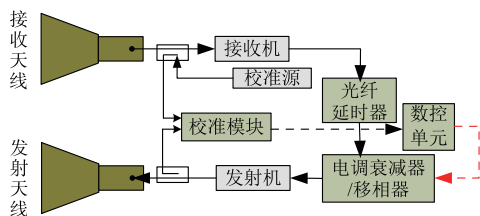


图7 幅相校准示意图

2.2.1 增益校准

校准源发出的校准脉冲信号从接收天线后端耦合进极化有源定标器射频通道,经过射频转发通道(包括接收机、光纤延时器、发射机等)后在发射天线后端通过耦合器输出,校准源输出的校准脉冲和经过射频转发通道的校准脉冲都进入增益校准电路,如图 7 所示,由于经过射频通道的校准脉冲经过一定的延时,两个脉冲检波后在时间上分开,采用数字方式对两个脉冲进行采样,根据脉冲采样差值调节电调衰减器控制电压,直到采集到的两个脉冲差值满足精度要求为止,通过此方法可以保证射频电路增益的稳定性达到 $\pm 0.1\text{dB}$,保证了四个极化通道幅度一致性优于 $\pm 0.2\text{dB}$.

2.2.2 相位校准

相位校准电路信号路径同增益校准电路,但是,由于相位校准需要参考信号和经过射频通道后的信号进行混频鉴相,需要两个信号有足够的重合时间,因此,相位校准信号不能像增益校准那样采用脉冲信号,需要采用连续波信号.参考通道信号和转发通道信号进

入校准模块进行混频鉴相,两路信号相位相同时,鉴相器输出为 0,因此,可以根据混频鉴相的输出调节电调移相器,使最终的鉴相器输出为 0,当 HH、HV、VH、VV 四个通道鉴相器输出结果都为 0,而参考信号经过的路径相同,因此,四个通道的相位可以认为是相同的,通过相位校准电路可以把通道间相位一致性误差控制在 5° 以内.

另外,较大的幅频特性和相频特性误差会产生成对回波,影响有源定标器点目标特性,导致点目标能量误差以及系统幅相特性提取误差^[12],基于此,该新型有源定标器设计时专门设计了幅相调节模块,采用多级均衡可调滤波技术保证系统幅频特性和相频特性指标,最终实现全频带幅频特性优于 $\pm 0.5\text{dB}$,相频特性优于 $\pm 5^{\circ}$,保证了有源定标器良好的点目标特性,该指标在轨测试中有源定标器图像得到验证.

3 在轨试验

3.1 天线方向图测量

有源定标器具有接收工作模式,SAR 过顶时可以直接获得 SAR 方位向天线方向图,用于天线方向图比较验证^[13].图 8 给出了某次卫星过顶时,不同有源定标器测量的 SAR 方位向方向图,五台设备在测绘带内沿方位向排列,卫星过顶时,有源定标器对脉冲信号进行检波,直接获取 SAR 方位向发射天线方向图.其中,ARC01 ~ ARC04 设置为测量 H 极化方向图,ARC05 设置为测量 V 极化方向图.表 1 统计了不同设备获取到天线方向图的峰值旁瓣比,从表 1 中可以看出:

(1) 多台设备测量的天线方向图之间最大偏差为 0.4dB :各台有源定标器不在同一距离向以及各台有源定标器接收检波器的线性度不一致都会导致其测量方向图的差异;

(2) 方位向方向图右边第一旁瓣比左边第一旁瓣低 1dB 左右;

(3) 方位向 H 极化方向图与 V 极化方向图基本一致,这与 SAR 天线地面方向图测试结果吻合.

表 1 峰值旁瓣比

		ARC01	ARC02	ARC03	ARC04	ARC05
峰值旁瓣比 (dB)	左	-12.7	-13.02	-12.89	-13.09	-12.99
	右	-13.77	-14.15	-14.02	-14.25	-14.44

3.2 SAR 脉冲特性分析

SAR 在轨发射脉冲经过了 SAR 信号源、发射通道以及发射天线整个链路,对其特性进行分析反映了 SAR 真实的发射脉冲特性,具有重要的意义.有源定标器可以直接记录 SAR 发射脉冲特性,通过获取的 SAR 发射脉冲 IQ 信号可以分析 SAR 发射脉冲信号特性.图

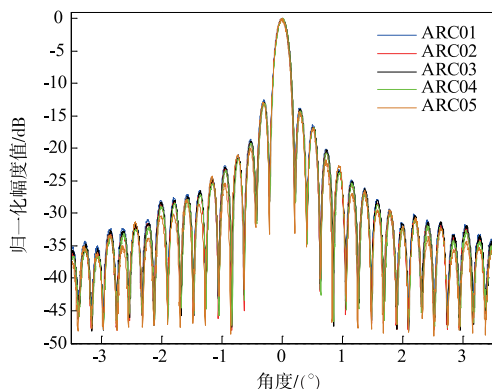
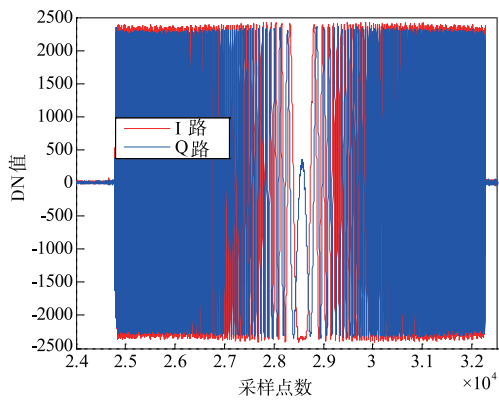
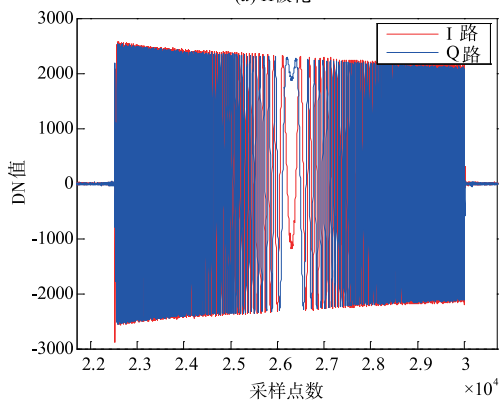


图8 有源定标器实际测量的SAR方位方向图

9 给出了某次卫星过顶时一台有源定标器获取的 SAR 发射脉冲 IQ 信号. 其中图 9(a) 为 H 极化 IQ 信号, 图 9(b) 为 V 极化 IQ 信号, 根据 IQ 信号可以分析 SAR 发射脉冲信号的带内平坦度、脉冲宽度、IQ 信号正交性和 IQ 幅度不平衡等指标. 表 2 给出了 SAR 脉冲特性部分指标, 通过对五台有源定标器接收脉冲特性分析可知, SAR 实际发射的脉冲宽度与理论设计值(25 μ s) 具有较高的一致性, IQ 幅度一致性和正交性具有很高的指标, H 极化信号带内平坦度优于 0.4dBp-p, V 极化信号带内平坦度优于 1.6dBp-p.



(a) H极化



(b) V极化

图9 SAR发射脉冲IQ信号

表 2 SAR 发射脉冲特性

	IQ 幅度不平衡	IQ 正交性	带内幅度平坦度	脉冲宽度
H 极化	0.25dB	3°	0.37dBp-p	24.88 μ s
V 极化	0.18dB	3.7°	1.6 dBp-p	24.86 μ s

3.3 极化矩阵分析

有源定标器可以工作于 $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 四种不同散射矩阵, 前三个矩阵可以用于极化定标, 后一个矩阵可以用于定标检验^[14], 每台设备都可以设置任意一种矩阵, 但每次工作时只能设置成一种工作状态. 某次极化定标时, 五台有源定标器参与了试验, 五台有源定标器矩阵设置如表 3 所示, 根据散射矩阵设置, HH 极化图像上应该显示 ARC02、ARC03、ARC04 三台设备, HV 极化图像上应该显示 ARC01 和 ARC03 两台设备, VV 极化图像上应该显示 ARC02、ARC03、ARC04 三台设备, VH 极化图像上应该显示 ARC03 和 ARC05 两台设备.

图 10 给出了该次定标场实际成像结果, 从图 10 可以看出, 成像结果与有源定标器矩阵设置相吻合, 且有源定标器具有较好的点目标特性. 另外, 图像左侧大范围的亮点为牧民的房子, 定标器上方的独立的亮点为三面角反射器和二面角反射器, 从图像可以看出, 牧民房子具有较强的同极化散射分量, 而交叉散射分量较弱.

表 3 有源定标器矩阵设置

设备编号	ARC01	ARC02	ARC03	ARC04	ARC05
矩阵设置	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

根据图 10 的极化图像, 可以对用于极化定标的有源定标器极化矩阵进行测量, 表 4 给出了用于极化定标的三台极化有源定标器的归一化极化散射矩阵, 从表 4 中可以看出, 测量矩阵幅度与设置矩阵相一致, 相位存在固定偏差, 根据多次测量结果可知, 该相位偏差为雷达系统引入, 通过极化校正可以对雷达的相位差进行校正.

表 4 测量的归一化极化失真矩阵

设备编号	极化矩阵设置值	归一化散射矩阵测量值
ARC01	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0037 + 0.00387i & 1 \\ -0.0005 & -0.0028 - 0.0057i \end{bmatrix}$
ARC03	$\begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -0.9655 - 0.2602i \\ -0.0833 + 0.9965i & 0.4480 - 0.8902i \end{bmatrix}$
ARC05	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0058 - 0.0051i & -0.0010 + 0.0006i \\ 1 & 0.0058 - 0.0052i \end{bmatrix}$

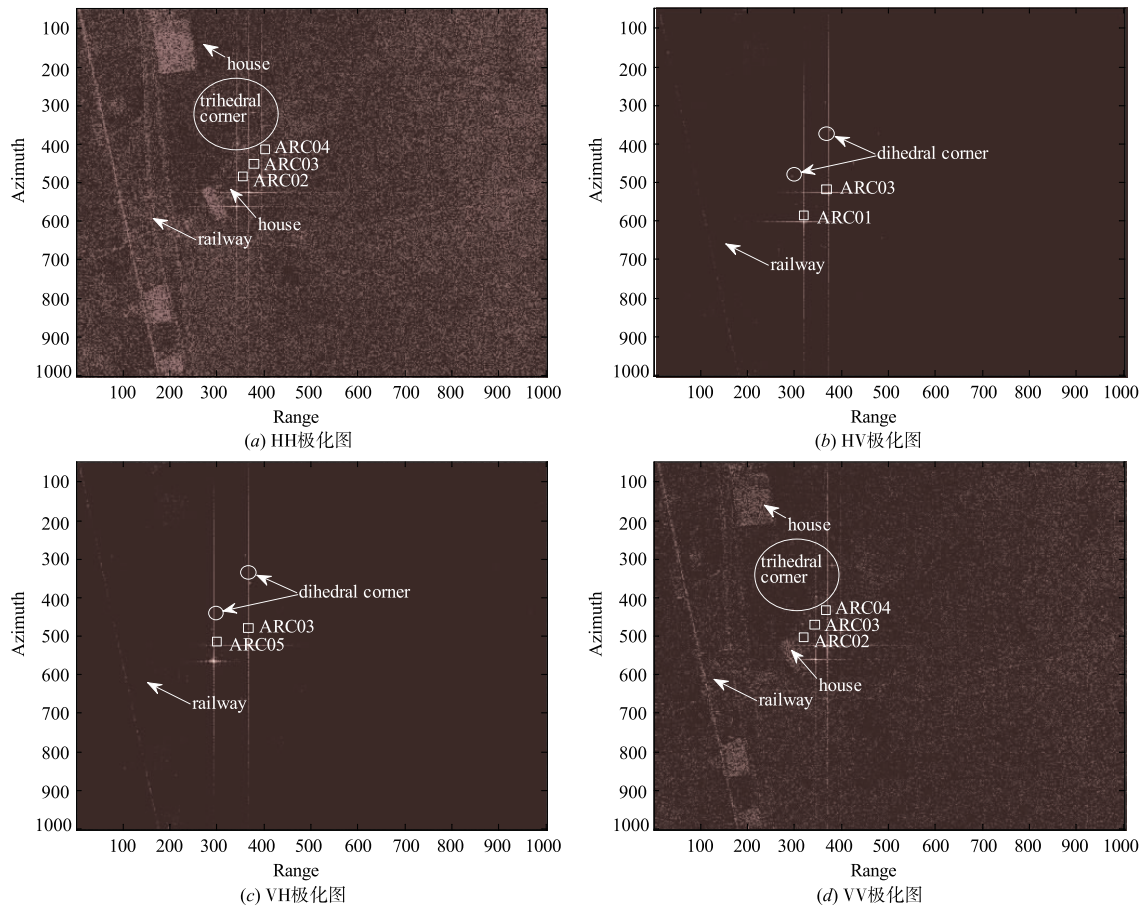


图10 定标场成像结果

3.4 极化隔离度分析

有源定标器采用高极化隔离度天线,可以对星载 SAR 进行极化定标,本文直接从有源定标器接收方向图分析 SAR 发射天线的极化隔离度指标.

SAR 工作于全极化模式时,交替发射 H 和 V 极化信号,当有源定标器设置成 $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 或 $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 散射矩阵时,理论上定标器只接收到 H 或者 V 极化信号,由于 SAR 发射天线存在极化隔离度,而 SAR 是 H 和 V 极化交替发射,有源定标器接收动态范围又比较大(大于 60dB),因此有源定标器 H(或 V)主极化接收时,会接收到 V(或 H)交叉极化分量,因此,可以通过比较接收到的 H 极化和 V 极化信号差用以分析 SAR 发射天线极化隔离度.图 11 给出了 SAR 全极化工作模式时,ARC01 和 ARC05 记录的 SAR 方位向发射方向图以及主瓣内局部放大图,有源定标器散射矩阵设置如表 3 所示.

根据 ARC01 设置的散射矩阵,ARC01 只能接收 H

极化信号,如果 SAR 和有源定标器极化隔离度都足够大,则 ARC01 接收不到 V 极化信号,但是从图 11(b)可以看出,ARC01 不但接收了 H 极化信号,V 极化信号也被接收了(SAR 发射信号时,H 极化和 V 极化交替发射).同样,根据 ARC05 设置的散射矩阵,ARC05 只能接收 V 极化信号,如果 SAR 和有源定标器极化隔离度都足够大,则 ARC05 接收不到 H 极化信号,但是从图 11(d)可以看出,ARC05 不但接收了 V 极化信号,H 极化信号也被接收了.极化隔离度量化分析见表 5,从表 5 可以看出,SAR 和有源定标器 H 和 V 极化都具有很高的隔离度.

表 5 极化隔离度量化分析

	主接收极化	主极化 DN 值/ 主极化功率	交叉极化 DN 值/ 交叉极化功率	极化 隔离度
ARC01	H	39850 / -23.15dBm	5742 / -68.65dBm	45.5dB
ARC05	V	42340 / -21.9dBm	7262 / -64.9dBm	43dB

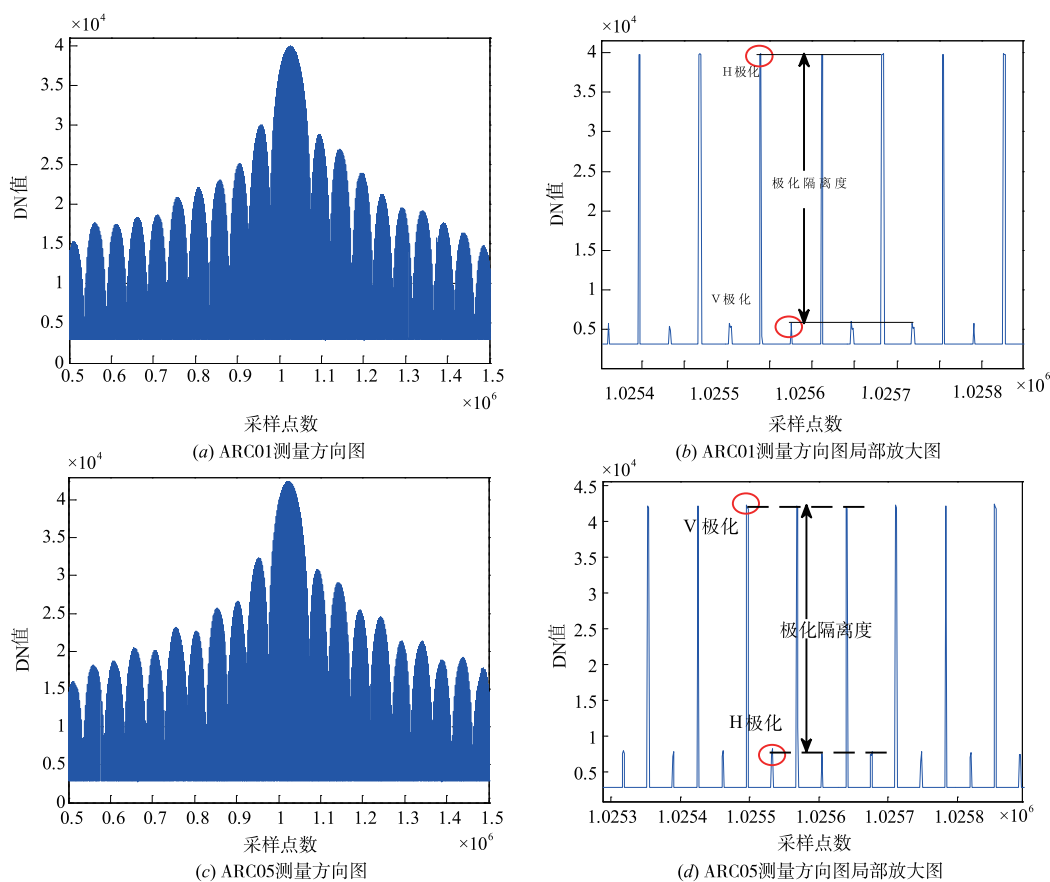


图11 有源定标器测量的SAR方位向发射方向图以及主瓣局部放大图

4 结论

本文提出了一种新型全极化有源定标器设计方案,利用该新型全极化有源定标器执行高分三号在轨测试时获取的数据,分析了 SAR 天线方向图、SAR 发射脉冲特性、SAR 发射天线极化隔离度以及有源定标器极化隔离度和极化散射矩阵,分析结果表明,SAR 方位向发射方向图实测指标与设计指标吻合,SAR 和有源定标器都具有很高的极化隔离度,另外,定标场实际成像结果验证了针对高分三号研制的有源定标器可以提供不同的散射矩阵且具有良好的点目标特性。

参考文献

- [1] 丁赤彪,刘佳音,雷斌,等. 高分三号 SAR 卫星系统级几何定位精度初探[J]. 雷达学报,2017,6(1):11-16.
Ding Chi-biao, Liu Jia-yin, Lei Bin, et al. Preliminary exploration of systematic geolocation accuracy of GF-3 SAR satellite system[J]. Journal of Radars, 2017, 6(1): 11-16. (in Chinese)
- [2] 邱伟,赵宏钟,周剑雄,付强. 基于联合稀疏性的高分辨全极化雷达成像研究[J]. 电子学报,2013,40(9):1685-1693.
Qiu Wei, Zhao Hong-zhong, Zhou Jian-xiong, Fu Qiang. High resolution full polarization radar imaging based on joint sparsity[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 40(9): 1685-1693. (in Chinese)
- [3] Hong Tan, Jun Hong. Calibration of compact polarimetric SAR images using distributed targets and one corner reflector[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(8): 4433-4444.
- [4] Daniel Rudolf, et al. A compact antenna rotation concept for precise polarimetric SAR calibration transponders[A]. The 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar[C]. Hamburg, Germany: EUSAR, 2016. 1167-1171.
- [5] Touzi R, Hawkins R K. On the use of transponder for high precision assessment & calibration of polarimetric radarsat-2[A]. The PolinSAR 2011 Workshop[C]. Frascati, Italy: PolinSAR, 2011. 1-38.
- [6] M Jirousek et al. Development of the highly accurate DLR Kalibri transponder[A]. The 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar[C]. Berlin, Germany: EUSAR, 2014. 1176-1179.
- [7] Durk-Jong PARK, et al. Development of active transponder for KOMPSAT-5 mission[A]. The 3rd Asia-Pacific International Conference on Synthetic Aperture Radar[C]. Seoul, Korea: APSAR, 2011. 794-797.

- [8] 陈琳,张晶晶,李洋,洪文. 单发双收 SAR 系统通用极化定标算法[J]. 雷达学报,2012,1(3):323-328.
Chen Lin, Zhang Jing-jing, Li Yang, Hong Wen. General calibration algorithm for single-transmitting-dual-receiving polarimetric SAR system [J]. Journal of Radars, 2012, 1(3):323-328.
- [9] 李亮,洪峻,明峰,梁维斌. 一种基于有源定标器的电离层对星载 SAR 定标影响校正方法[J]. 电子与信息学报,2012,34(5):1096-1101.
Li Liang, Hong Jun, Ming Feng, Liang Wei-bin. An approach for ionospheric effects correction on spaceborne SAR calibration based on active radar calibrator [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(5): 1096-1101. (in Chinese)
- [10] 张健丰,李平辉,朱彤. 高隔离度宽带双极化微带天线设计[J]. 电子学报,2016,44(4):775-779.
Zhang Jian-feng, Li Ping-hui, Zhu Tong. Design of wideband dual-polarized microstrip antenna with high isolation [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(4):775-779. (in Chinese)
- [11] Harry Jackson, IAN Sinclair, Sebastian Tam. ENVISAT/ASAR precision transponders [A]. Proceeding of the CEOS Workshop [C]. Toulouse, France, CEOS, 1999. 311-316.
- [12] 林健智,李卫星,张月,陈曾平. 极化有源雷达校准器的幅相失真分析及修正[J]. 电子学报,2016,44(6):1512-1515.
Lin Jian-zhi, Li Wei-xing, Zhang Yue, Chen Zeng-ping. Analysis and modification of amplitude-phase distortion in polarimetric active radar calibrator [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(6):1512-1515. (in Chinese)
- [13] M Schwerdt, et al. Independent verification of the sentinel-1A system calibration [J]. IEEE Journal of Selected Topic in Applied earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(3):994-1007.
- [14] Ridha Touzi, R K Hawkins, Stephane Côté. High-precision assessment and calibration of polarimetric radarsat-2 SAR using transponder measurements [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1):487-503.

作者简介



李亮 男,博士,1980年生于河南南阳,现为中国科学院电子学研究所副研究员,硕士生导师,主要从事星载 SAR 有源定标器系统设计、SAR 系统定标技术以及电离层对星载 SAR 成像影响校正等方面的研究。
E-Mail: liliang282@163.com



洪峻 男,1960年生于安徽黄山,现为中国科学院电子学研究所研究员,博士生导师,主要从事 SAR 定标技术研究以及机载 SAR 系统设计。



陈琦 男,博士,1980年出生于内蒙古,现为自然资源卫星应用中心研究员,主要从事星载 SAR 成像以及量化遥感方向研究。



王爱春 男,博士,1981年出生于内蒙古,现为自然资源卫星应用中心工程师,主要从事多基线干涉 SAR 处理方法及应用研究。



王宇 男,博士,1976年生于陕西西安,现为中国科学院电子学研究所副研究员,主要从事星载机载 SAR 定标方法研究。



明峰 男,博士,1977年生于山东临沂,现为中国科学院电子学研究所副研究员,主要从事 SAR 定标技术研究以及 SAR 数据量化处理。

朱勇涛 男,硕士,1976年生于湖北,现为中国科学院电子学研究所副研究员,主要从事机载 SAR 系统集成测试以及星载 SAR 系统外场定标。